

**COMPARACION DEL MODULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE
OBTENIDO A PARTIR DE DEFLEXIONES DE IMPACTO Y MEDIANTE
ENSAYOS DE LABORATORIO EN UN PROYECTO VIAL DEL
DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA**

**BLANCA LUCIA BONILLA DE LA TORRE
MAX ROJAS TORRES**

**UNIVERSIDAD NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN PAVIMENTOS
BOGOTA, D.C.
2010**

**COMPARACION DEL MODULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE
OBTENIDO A PARTIR DE DEFLEXIONES DE IMPACTO Y MEDIANTE
ENSAYOS DE LABORATORIO EN UN PROYECTO VIAL DEL
DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA**

**BLANCA LUCIA BONILLA DE LA TORRE
MAX ROJAS TORRES**

Trabajo de Grado

**DONALDO ELÍAS CASTILLA RODRÍGUEZ
Director - Ingeniero Civil.
M.s. C. Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN PAVIMENTOS
BOGOTA, D.C.
2010**

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D. C. 25 de Mayo de 2010

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD

MAYOR GENERAL (r)
EDUARDO ANTONIO HERRERA BERBEL
Rector

MAYOR GENERAL (r)
GABRIEL EDUARDO CONTRERAS OCHOA
Vicerrector General

DRA. MARTA LUCIA BAHAMÓN JARA
Vicerrectora Académica

DR. ERNESTO VILLAREAL SILVA Ph.D.
Decano Facultad de Ingeniería

ING. PAOLA ANDREA NIÑO SUAREZ Ph. D.
Director Postgrados Facultad de Ingeniería

ING. DIEGO CORREAL MEDINA Ms.C.
Director Programa de Ingeniería Civil

ING. JOSÉ GONZALO RÍOS MARÍN Ms.C.
Director Programa de Ingeniería Civil

APROBACIÓN

El trabajo de grado titulado “COMPARACION DEL MODULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE OBTENIDO A PARTIR DE DEFLEXIONES DE IMPACTO Y MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO EN UN PROYECTO VIAL DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA”, presentado por los ingenieros Blanca Lucia Bonilla de la Torre y Max Rojas Torres en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de “Especialista en Ingeniería de Pavimentos”, fue aprobado por el Director.

ING. DONALDO ELÍAS CASTILLA RODRÍGUEZ Ms.C
Director

ING. GONZALO RÍOS
Metodólogo Asesor

Bogotá D. C., Mayo de 2010

ADVERTENCIA

La Universidad Militar “Nueva Granada” no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados por los autores en sus respectivos trabajos de grado; solo vela porque no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no contenga ataques personales y únicamente se vea en él el anhelo de buscar la verdad científica.

AGRADECIMIENTOS

A mi hija por apoyarme y sacrificar parte de su tiempo que destiné a esta Especialización.

A mis padres por ser ejemplo de responsabilidad, disciplina y compromiso.

A mi esposo por atender con dedicación los cuidados de nuestra hija y apoyarme siempre.

A mis profesores por compartir su conocimiento y experiencia en cada clase dictada.

A mi familia que siempre me brindó comprensión, confianza y apoyo incondicional

Al Ingeniero Donaldo Elías Castilla Rodríguez Ms. C, por la asesoría prestada a lo largo de este estudio y por el apoyo que nos dio en el camino que hoy culmina con el presente proyecto, por compartir sus conocimientos.

A nuestros amigos más cercanos, a esos que siempre me han acompañado y con los cuales he contado desde siempre.

Al Ingeniero Gonzalo Ríos por su acompañamiento y asesoría metodológica durante la elaboración de esta monografía.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1 Descripción del problema	14
1.2 Formulacion del problema	15
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Información General del Proyecto	16
2.1.1 Localización y descripción del Proyecto	16
2.2 CBR (California Bearing Ratio)	19
2.3 Módulo Resiliente en Laboratorio - Método I.N.V. E – 156	22
2.4 Estática o Movimiento Lento	23
2.5 Vibración	24
2.6 Deflectómetro de Impacto	25
2.6.1 Factores que influyen en la Auscultación Estructural	26
2.6.1.1 Temperatura	27
2.6.1.2 Humedad	27
2.6.1.3 Tiempo de Carga	28
2.6.1.4 Geometría	28
2.6.1.6 Aplicaciones de la Evaluación Estructural en la Gestión	29
2.6.2 Niveles de Aplicaciones	29
2.6.2.1 Aplicaciones a Nivel de Red	29
2.6.2.2 Aplicaciones a Nivel de Proyecto	30
2.7 Evaluación de la Calidad en las Diversas Etapas de Construcción	30
2.7.1 Seguimiento del Comportamiento de los Pavimentos	31
Estudios Especiales	31
2.7.3 Determinación de Tramos en Proyectos	31
2.7.3.1 Parámetros Utilizados en la Caracterización del Cuenco de Deflexiones	32
2.7.4 Deflexión Central Do	34
2.7.5 Módulo Resiliente de la Subrasante MR	34
2.7.6 Módulo Equivalente del Pavimento EP	35
2.7.7 Número Estructural SN	36
2.7.8 Retrocálculo de Módulos	36
2.7.9 Corrección de Módulos para el Diseño de la Rehabilitación de	36

Pavimentos Asfálticos de Carreteras Basado en La Guía Metodológica	36
2.8 Módulo Resiliente Obtenido a partir de Ensayos de Laboratorio	37
2.9 Evaluación de la Subrasante	40
2.10 Evaluación de los Grar	42
3. METODOLOGÍA	45
3.1 La Deflexión como Parámetro de Evaluación Estructural	46
3.2 Métodos de Evaluación Estructural	47
4. CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO	49
4.1 Deflexión Central D_0	49
4.2 Cálculo del Módulo Resiliente de la Subrasante MR	51
4.3 Cálculo del Módulo Equivalente del Pavimento EP	51
4.4 Número Estructural SN	54
4.5 Módulo Resiliente obtenido en el Laboratorio	55
4.6 Comparación de Resultados	55
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización General del corredor del estudio	16
Figura 2. Localización específica del tramo	16
Figura 3. Temperatura, brillo solar, humedad y evaporación Aeropuerto El Dorado	17
Figura 4. Precipitación Media Mensual Aeropuerto El Dorado	18
Figura 5 Cuenco de deflexiones	32
Figura 6 Equipo NAT	38
Figura 7 Perfil Estratigráfico PR0+000 al PR11+150	40
Figura 8 Características de Plasticidad de la Subrasante	41
Figura 9 Características Granulométrica de la subrasante	41
Figura 10 Características Granulométrica de la subrasante	42
Figura 11 Características de Plasticidad de los granulares	43
Figura 12 Características Granulométrica de la subrasante	43
Figura 13 Esquema de la deflexión de un pavimento flexible	46
Figura 14 Deflexión Central El Portal – El Antojito del PR0+000 al PR11+150	50
Figura 15 Módulo Equivalente Carretera El Portal - El Antojito	52
Figura 16 Número estructural SN Carretera El Portal –El Antojito	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1 Valores de carga unitaria	21
Cuadro N° 1. Energías de compactación	21
Cuadro N° 3. Clasificación típica de los suelos para infraestructura de Pavimentos	22
Cuadro N° 4 Resumen de parámetros que emplean la información del FWD	32
Cuadro N° 5 Tendencias de d_0 y el valor de ÁREA	33
Cuadro No. 6 Deflexión central Carretera El Portal –El Antojo	51
Cuadro No. 7 Módulos Resilientes de subrasante Portal- El Antojo	52
Cuadro No. 8 Número Estructural Carretera El Portal-El Antojo – Ambos carriles	55
Cuadro No. 9 Comparación de módulos resilientes	55

LISTA DE ANEXOS

Anexo No. 1 Resultados de Ensayos de Evaluación Geotécnica

Anexo No. 2 Resultados de las Deflexiones FWD

Anexo No. 3 Resultados de las Variables Estructurales

Anexo No. 4 Procedimiento de Calibración FWD

Anexo No. 5 Memorias de Cálculo Verificación Método Racional

Anexo No. 6 Resultados del Módulo Resiliente obtenido en el Laboratorio

INTRODUCCION

El módulo resiliente de la subrasante es el parámetro más importante para el diseño de una estructura de pavimento.

Sin embargo los valores obtenidos de los módulos se pueden determinar por ensayos de medición directa, por equipos de laboratorio o por retrocálculo a partir de mediciones de deflectometría.

Existen diferentes métodos para calcular la capacidad estructural del pavimento, esto con el fin de determinar la resistencia a las cargas a las que se ve sometido. Para calcular las deflexiones en campo, actualmente existen diferentes métodos, el más aplicado es el deflectómetro de impacto.

El presente estudio se llevará a cabo en la carretera El Portal – El Antiojo que vía une la ciudad de Bogotá, con la carretera Bogotá – Villavicencio, esta es de gran importancia porque sirve de apoyo principalmente cuando la Concesión realiza labores de mantenimiento en el túnel de El Boquerón obligando a desviar el tráfico por esta carretera.

Para calcular el módulo resiliente de la subrasante en carretera El Portal - El Antiojo se llevaron a cabo medidas de deflexión en el mes de enero de 2010, mediante el empleo del FWD KUAB 50 2m de la firma GEVIAL LTDA.

Para el análisis y procesamiento de la información se llevará a cabo de acuerdo con los lineamientos y normas establecidos en la Guía Metodológica para la Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras del INVIAS.

Se determinarán parámetros estructurales como la deflexión central, el módulo resiliente de la subrasante, y el número estructural de la vía seleccionada a través de un procedimiento de retro cálculo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La duración de las estructuras de pavimentos, normalmente son menores a las planteadas en la etapa de diseño, las vías se deterioran prematura y aceleradamente en el tiempo, debido a imprevistos en la etapas de estudio y diseño, así mismo puede haber falencias en las etapas de construcción o de operación de la vía (mantenimientos defectuosos o insuficientes).

1.1 Descripción del problema

El Módulo Resiliente de la Subrasante es un parámetro fundamental que normalmente tiene una gran influencia en los espesores que se obtienen en los diseños de las estructuras de pavimento.

La obtención del Módulo Resiliente de la Subrasante se correlaciona por ensayos de CBR, sin embargo el proceso de obtención de CBR es cuestionado por cuanto este ensayo somete la muestra de suelo a un esfuerzo de corte y los suelos trabajan a esfuerzo de flexo-compresión.

Por otra parte, los ensayos de laboratorio para determinar el módulo resiliente M_r son escasos, ya que existen pocos equipos disponibles en algunos laboratorios de Universidades y además sus altos costos.

Actualmente existen otros métodos no destructivos para obtener el módulo resiliente M_r , los cuales se basan en medida de Deflexiones de impacto.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el mantenimiento de vías, a través del tiempo, es posible ver como los métodos utilizados para calcular los módulos que gobiernan las estructuras, generan diseños estructurales no adecuados para las exigencias de una vía, situación que ha generado un servicio vial inadecuado, con gran incomodidad e inseguridad vial para los usuarios, con el consecuente sobre-costos en las labores de mantenimiento periódico, para las entidades prestadoras del servicio.

La situación expuesta, se ha mantenido por largo tiempo en el país, con los problemas que le atañen, por tal razón es necesario estudiar los motivos que generan dichas deficiencias dentro de las cuales se encuentra el estudio de los módulos resilientes de los materiales de soporte, razón por la cual ha surgido la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué relación existe entre los valores obtenidos a partir de los ensayos destructivos y los no destructivos, de los módulos resilientes de la capa que soporta la estructura que se encuentra en servicio?

1.2 Formulación del problema

¿Por qué se debe conocer el módulo resiliente a partir de método no destructivo de la estructura de pavimento con el FWD deflectómetro de impacto?

¿Por qué se debe conocer el módulo resiliente a partir de ensayos de laboratorio?
- método destructivo de la estructura de pavimento.

1.3 Justificación

Las entidades estatales invierten grandes recursos económicos, en la construcción de vías y el mantenimiento de las mismas, sin embargo, la vida útil esperada de éstas, no compensa la inversión realizada generando sobrecostos, en los procesos de mantenimiento periódico y rehabilitación, aún en vías recientemente construidas. Estos recursos están siendo mal utilizados, puesto que podrían servir para atender nuevos proyectos que son indispensables para el desarrollo del país. En este trabajo se buscará comparar el módulo resiliente a partir de ensayos no destructivos con muestras llevadas al laboratorio para conocer el comportamiento de la subrasante que soporta la estructura de un pavimento, en la carretera El Portal – El Antojito, localizada en el departamento de Cundinamarca, que incluye los procesos de:

- Retrocálculo del módulo resiliente
- Obtención de muestras de laboratorio

De esta forma, se toman muestras de la subrasante para llevarlas al laboratorio, y hacer una comparación con los resultados obtenidos mediante el F.W.D. Falling Weight Deflectometer (deflectómetro de impacto), posteriormente se hace un Retrocálculo, que finalmente muestra los resultados de los Módulos resilientes, los cuales serán analizados y comparados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Comparar los módulos resilientes M_r obtenidos por deflectometría de impacto, ensayo no destructivo FWD contra el módulo resiliente M_r de laboratorio a partir

de la evaluación y diagnóstico de las condiciones de la Carretera El Portal – El Antojito.

1.4.2 Objetivos específicos

- Conocer el módulo resiliente a partir de método no destructivo de la estructura de pavimento con el FWD deflectómetro de impacto.
- Conocer el módulo resiliente a partir de ensayos de laboratorio - método destructivo de la estructura de pavimento.

2. MARCO TEÓRICO

INFORMACION GENERAL DEL PROYECTO

2.1.1 Localización y descripción del Proyecto

El tramo vial en análisis se encuentra localizado en el departamento de Cundinamarca, el cual goza de una posición favorable dentro de la Región Andina, porque cuenta con todos los pisos térmicos, desde el cálido en el valle del río Magdalena y el piedemonte de Los Llanos Orientales, hasta el Páramo del Sumapaz, lo que ofrece grandes posibilidades en términos de diversificación de producción agrícola y en general de utilización del suelo.

Cundinamarca limita con cinco (5) departamentos: Boyacá al norte, Meta al oriente, Huila al sur, Tolima y Caldas al occidente, Río Magdalena de por medio, como se muestra en la figura No. 1.

El territorio del Departamento tiene un área de 24,210 Kilómetros cuadrados de Extensión y 1'658.698 habitantes (Censo 2005). La densidad General de población alcanza a los 69 habitantes por kilómetro cuadrado.

Figura 1. Localización General del corredor del estudio



Fuente: www.invias.gov.co

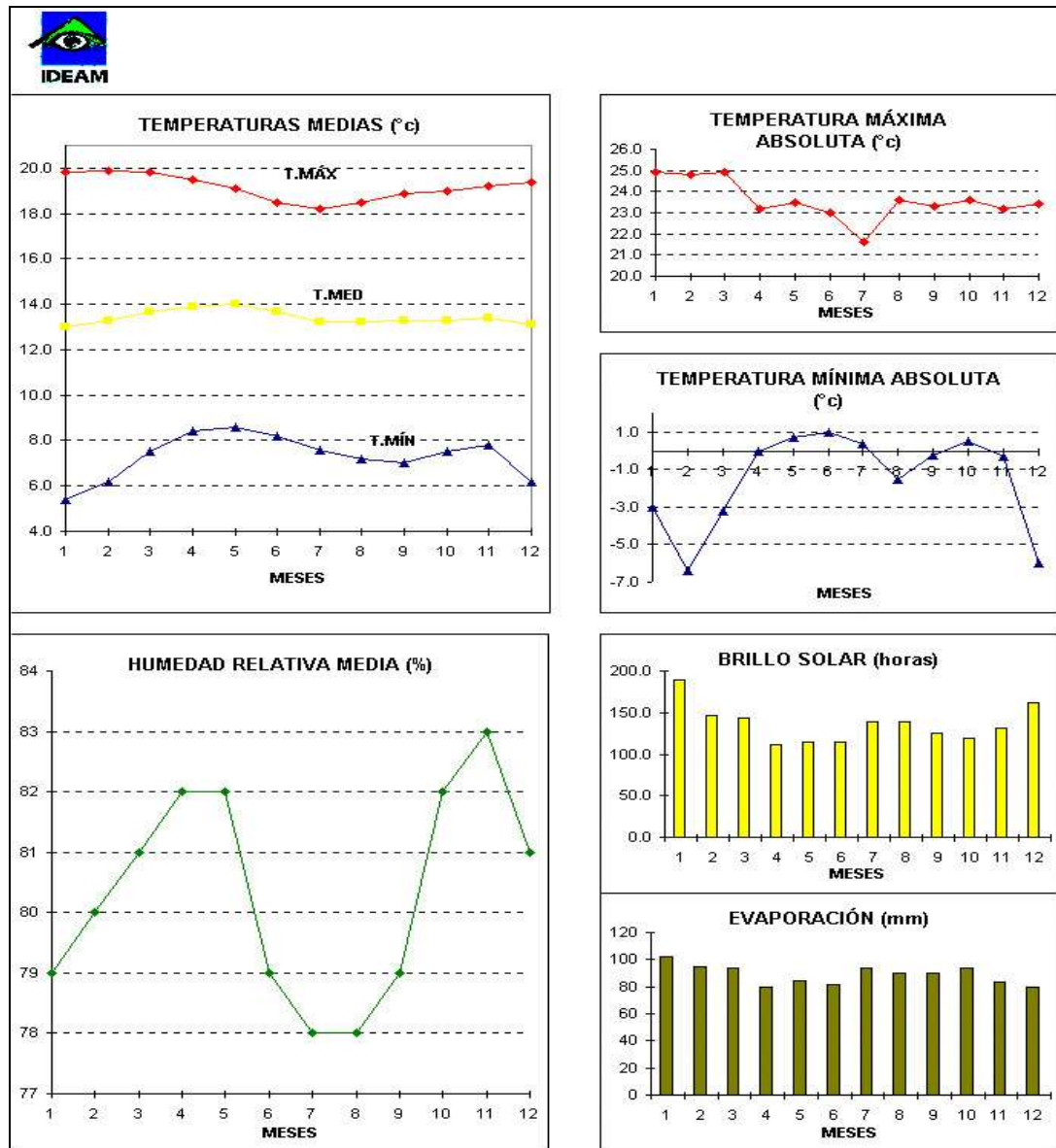
Figura 2. Localización específica del tramo



Fuente: www.invias.gov.co

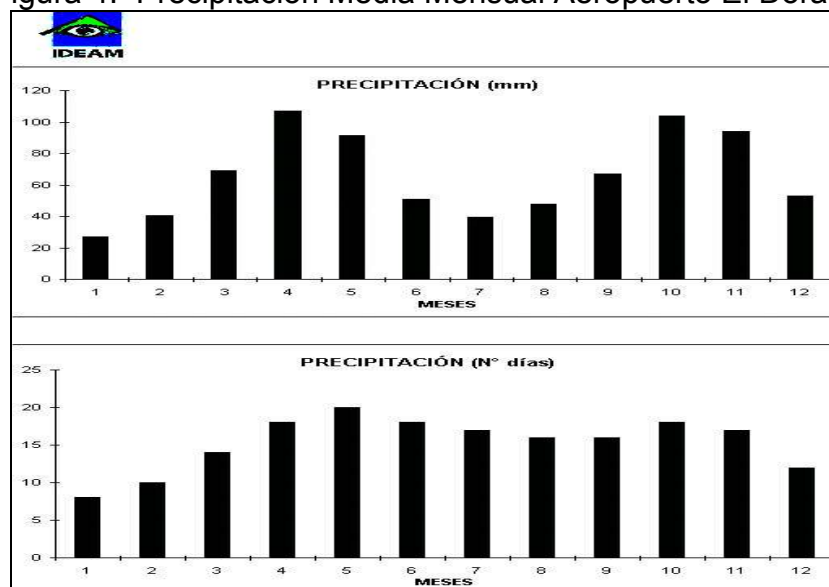
Las características climáticas del corredor el cual es un parámetro fundamental en el diseño, pero sobretodo en el comportamiento de la carpeta asfáltica se presentan a continuación:

Figura 3. Temperatura, brillo solar, humedad y evaporación Aeropuerto El Dorado



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM.

Figura 4. Precipitación Media Mensual Aeropuerto El Dorado



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM.

En las figuras 3 y 4 se observa que la temperatura promedio para Bogotá es de 14°C y la precipitación menor a 2000 mm/año. Sin embargo, se observa que en la zona se tiene que llueve muy cercano a los 200 días por año.

En el municipio de Chipaque¹ la temperatura media es de 13 °C y la precipitación anual es de 815 mm/año.

Las características geométricas de la carretera en mención se destacan, por ser principalmente de una calzada sencilla, con un carril de circulación por sentido, con pequeños radios de giro en la mayoría de las curvas, lo cual dificulta la transitabilidad de vehículos articulados. El recorrido del proyecto muestra una topografía ondulada y montañosa con tramos que poseen fuertes pendientes. Esta vía en la actualidad sirve como vía alterna a la carretera Bogotá – Villavicencio y es utilizada por la concesión cuando esta requiere realizar algún tipo de mantenimiento al túnel de El Boquerón.

A continuación se presentan algunas fotografías que muestran un panorama general descriptivo de las zonas del corredor en estudio, indicando su ubicación y el respectivo comentario.

¹ <http://Chipaque-Cundinamarca.gov.co>

	
<p>Fotografía No. 1, PR0+800 Pavimento en mal estado, piel de cocodrilo de severidad alta</p>	<p>Fotografía No. 2 PR4+600. Se observa fisuras longitudinales de severidad alta cerca al borde de la vía.</p>
	
<p>Fotografía No. 3 K10+800. Presencia de piel de cocodrilo con afloramiento de agua y material vegetal.</p>	<p>Fotografía No. 4 K9+800 Presencia de parcheos en regular estado.</p>

Fotografías: El Portal - El Antojito Fuente: Autores del presente estudio

2.2 CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

RAZON DE SOPORTE DE SUELOS COMPACTADOS - ENSAYO DE C.B.R.

El ensayo tiene como objetivo determinar la capacidad portante de un suelo en función de su estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique.

El Ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio) ² se puede llevar a cabo sobre un suelo compacto en laboratorio o bien sobre muestras inalteradas de un determinado terreno. Una vez preparadas las muestras, éstas pueden ser sometidas a inundación de agua o ensayarlas sin inmersión.

- Generalidades

El ensayo de C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y esta normado con el número ASTM D 1883-73.

Se aplica para evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de sub – bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%.

Este ensayo puede realizarse tanto en laboratorio como en terreno, aunque este último no es muy practicado.

- Ensayo de C.B.R. (Nch 1852 of.81)

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en Kilos/cm² (libras por pulgadas cuadrada, (psi)) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 centímetros cuadrados) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada, en ecuación, esto se expresa:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100$$

² Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

Los valores de carga unitaria tal como aparecen en el cuadro N° que deben utilizarse en la ecuación son:

Cuadro N° 1 Valores de carga unitaria

Penetración		Carga unitaria patrón		
mm	Pulgada	Mpa	Kg/cm2	Psi
2,54	0,1	6,90	70,00	1000
5,08	0,2	10,30	105,00	1500
7,62	0,3	13,10	133,00	1900
10,16	0,4	15,80	162,00	2300
12,7	0,5	17,90	183,00	2600

Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

El número CBR³ usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0,1”), sin embargo, si el valor del CBR para una penetración de 5.08 mm (0,2”) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de CBR.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar. A continuación, utilizando los métodos 2 o 4 de las normas ASTM D698-70 ó D1557-70 (para el molde de 15.5 cm de diámetro), se debe compactar muestras utilizando las siguientes energías de compactación:

Cuadro N° 2. Energías de compactación

Método	Golpes	Capas	Peso del martillo N
D698 2 (suelos de grano fino)	56	3	24,5
4 (suelos gruesos)	56	3	24,5
D1557 2 (suelos de grano fino)	56	5	44,5
4 (suelos gruesos)	56	5	44,5

Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

³ Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

El ensayo de CBR⁴ se utiliza para establecer el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas, la siguiente tabla da una clasificación típica:

Cuadro N° 3. Clasificación típica de los suelos para infraestructura de pavimentos

CBR	Clasificación general	Usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0 – 3	muy pobre	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3 – 7	pobre a regular	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7 - 20	Regular	Sub base	OL,CL,ML,SC, SM,SP	A2,A4,A6,A7
20 - 50	Bueno	Base,subbase	GM,GC,W,SM, SP,GP	A1b,A2-5,A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW,GM	A1-a,A2-4,A3

Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

Existen algunos métodos de diseño de pavimentos en los cuales se leen tablas utilizando directamente el número CBR y se lee el espesor de la subrasante (por ejemplo “Principios de diseño de pavimentos”, Jhon Wiley & Sons, 1959, Capítulo 14 y 15). A partir del ensayo del CBR se puede determinar el porcentaje de expansión de los suelos.

2.3 MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO - MÉTODO I.N.V. E – 156

Este método cubre los procedimientos normalizados para la determinación del módulo elástico-dinámico (de resiliencia) de los suelos. Incluye la preparación y ensayo de suelos no tratados, bajo condiciones que representan una simulación razonable de las características físicas y de los estados de esfuerzos de los materiales de la subrasante, bajo pavimentos flexibles sometidos a las cargas debidas al tránsito.

Los métodos descritos, son aplicables a muestras inalteradas de materiales naturales, a muestras compactadas de sub-rasante y a muestras transportadas, preparadas para ser ensayadas, por compactación en el laboratorio.

Los valores del módulo resiliente (elástico-dinámico) determinados con estos procedimientos, pueden ser empleados en las teorías de sistema de capas elástico-lineales y elástico-no lineales, para calcular la respuesta física de las

⁴ Fuente: www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm

estructuras de pavimentos.

Un esfuerzo desviador axial repetido, de magnitud, duración y frecuencia fijas se aplica a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen es sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. La respuesta a la deformación axial resiliente (recuperable) del espécimen, es medida y empleada para calcular los módulos resilientes dinámicos dependientes del esfuerzo.

El ensayo de módulo resiliente, proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación, de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el análisis del sistema de capas en pavimentos.

También, proporciona un medio de evaluación de los materiales de construcción de pavimentos, incluyendo suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones ambientales y de estado de esfuerzos, que simulen realísticamente las situaciones existentes en pavimentos sometidos a cargas móviles del tránsito.

2.4 ESTÁTICA O MOVIMIENTO LENTO

Carga estática o de movimiento lento, es la que corresponde a la primera generación, originada básicamente, con el desarrollo de la viga Benkelman en la WASHO Road Test. Estos equipos proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga fija o de movimiento lento [Huang, 1993]⁵.

Para su uso, generalmente necesitan un vehículo cargado, para lograr la exigencia del ensayo. Esta actividad requiere mucho tiempo y una labor intensiva. Entre estos equipos se encuentran:

- **Base Profunda:** Desde la superficie del pavimento se hace un pozo de tres metros de profundidad, en el fondo del cual se instala un medidor de deflexión. Su objetivo es obtener una medición de deflexión absoluta del pavimento [MOP, 1986].
- **Viga Benkelman:** Este equipo opera en base al principio de palanca, debe ser usada con un camión cargado, normalmente 80 kN en un eje, con las ruedas infladas a una presión de 0,48 a 0,55 Mpa. Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo el rebote cuando el vehículo se aleja. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador (método canadiense). En el método WASHO, la

⁵ Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

punta de la viga se coloca a 1,20 m adelante del par de ruedas, se toma una lectura inicial. Al cruzar el camión se toma la lectura máxima y una al final de la operación.

- **Deflectómetro Lacroix:** El deflectómetro Lacroix consiste en un camión con un peso estándar en su eje posterior, cuya separación entre ejes es 6,75 m. En él, van montadas dos vigas similares a la Benkelman. La forma de medir es similar a la viga Benkelman.
- **Curviámetro:** Consiste en un equipo para medir deflexión sobre una longitud de cuatro metros, él va montado sobre un camión de dos ejes, con el cual se puede aplicar una carga entre 80 y 130 kN. Las medidas se realizan a una velocidad de 18 km/h y se repiten cada 5 m [Sánchez, B. y Acútegui, E, 1994].

2.5 VIBRACIÓN

La siguiente generación de equipos involucró la aplicación de cargas dinámicas vibratorias. ⁶Estos equipos son más móviles y más productivos que los equipos estáticos e hicieron de la medición de deflexiones una faena de rutina para inspeccionar los pavimento [Dynatest y SME, 1994]. Las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática: por lo tanto, estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el pavimento. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro. Una ventaja de este tipo de equipos sobre los estáticos, es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal de este método es que las cargas reales que transitan por los pavimentos no tienen el mismo comportamiento que las que aplican ellos [De Solminihaç, H. E., 1994]. Entre los equipos más característicos se encuentran [Dynatest y SME, 1994]:

- **Dynaflect (electro - mecánico):** Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplica un rango de fuerzas entre picks de 1.000 lbs.. Para medir las deflexiones cuenta con cinco transductores de velocidad ubicados a 0, 12, 24, 36 y 48 pulgadas respectivamente. Es fabricado por Geolog Inc.
- **Road Rater (electro - hidráulico):** Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas, con él produce un rango de

⁶ Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

frecuencias entre 5 y 60 Hz. Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad. Es fabricado por Foundation Mechanics, Inc.

- **WES Heavy Vibrator:** Fue desarrollado por la Corps of Engineers USA, para la evaluación de pavimentos de aeropuertos. El aplica una precarga de 71 kN., con una carga vibratoria de 130 kN a una frecuencia de 15 Hz. Este equipo no está disponible en el mercado.

2.6 DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

Son equipos que entregan una carga de impacto transiente sobre el pavimento (falling weight deflectometer, FWD). Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes cargas de impacto. La ventaja principal de estos equipos es su mecanismo de carga, ya que permite modelar bastante bien la magnitud como la duración de una carga real del tránsito. Los FWD aplican un impulso que simula medio seno, con un pick mínimo de fuerza de 50 kN, con una duración del impulso de 20 a 60 ms y un tiempo de caída en el rango de 10 a 30 ms. Para realizar las mediciones de deflexiones se utilizan geófonos o transductores de velocidad (Dynatest, Phoenix, Foundation Mechanics) y sismómetros o una combinación de LVDT/acelerómetros (KUAB) [Dynatest y SME, 1994].



Fuente: www.siproma.com.ar/.../Evaluacion%20Estructural%20con%20FWD



Fuente www.apsa.cl/equipos.html

- Las mediciones se obtienen muy rápidamente, con la capacidad para medir deflexiones absolutas a través de un ensayo no destructivo.
- Ventajas
- Es un ensayo no destructivo
- Manejado por una sola persona
- Preciso y rápido (hasta 60 ensayos/hora)
- Amplio rango de carga (7 a 120 KN)
- Diseñado para múltiples propósitos en el área de pavimentos variando desde caminos sin asfalto hasta pista de aeropuertos
- Excelente repetitividad
- Ideal para sistemas mecanicistas y analíticos de diseño

2.61 Factores que influyen en la auscultación estructural

En los procedimientos para estimar el módulo de un material, se deben considerar implícitos rangos de temperatura, frecuencia de carga, entre otros. Debido a la importancia de estos factores es necesario describir cómo influyen en las mediciones, ya que pueden inducir a errores al momento de interpretar los resultados.

2.6.1.1 Temperatura

Debido a lo significativo de los gradientes de temperatura en los países que tienen estaciones, es necesario normalizar las deflexiones de acuerdo a la temperatura en que se realizaron las mediciones. La importancia de ello radica en que durante el transcurso de un ciclo diario las losas experimentan variaciones en las deflexiones por efecto de los cambios térmicos [IDIEM, 1992] y la condición termosensible de los asfaltos, que afecta la magnitud de la deflexión del pavimento para las mismas condiciones de carga [DICTUC, 1992].

En el caso de los pavimentos asfálticos, se han desarrollado métodos para corregir la deflexión máxima, los cuales se definen como normalización de deflexiones. Ellos se utilizan para transformar el valor de deflexión obtenida en determinadas condiciones de carga y temperatura, al valor que correspondería a una temperatura de referencia. En zonas estacionales, para el caso de pavimentos asfálticos se han desarrollado fórmulas que permiten corregir la deflexión a una temperatura de referencia de 20 ° C [MOP, 1989]. Otro aspecto importante de considerar con respecto a la temperatura es el estado térmico del pavimento, ya que para una temperatura medida a una cierta profundidad, pueden existir dos condiciones completamente diferentes. Se puede dar el caso que la temperatura a más profundidad sea mayor o menor que la medida, lo que implica un comportamiento completamente diferente en la respuesta estructural del pavimento.

2.6.1.2 Humedad

La humedad puede afectar las mediciones de deflexiones debido a su influencia en las bases, subbases y subrasantes, ya que algunos materiales con los que se construyen o están en terreno son sensibles a su presencia. Su efecto depende del tipo de suelos:

- ♦ **Suelos finos:** La humedad influye en los resultados de las mediciones debido a que su comportamiento depende del grado de humedad que posean. Los principales factores que influyen en ellos son la presión de poros, los sistemas de cohesión electrolítica entre arcilla y agua y el grado de saturación.
- ♦ **Suelos granulares:** El comportamiento de este tipo de suelos es relativamente insensible al nivel de humedad.

2.6.1.3 Tiempo de carga

El efecto del tiempo de carga o la frecuencia con que es aplicada, tiene una gran influencia en los valores obtenidos a partir de las mediciones, por ejemplo:

- ♦ **Materiales ligados con asfalto:** Están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza viscoelástica de este material. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.
- ♦ **Materiales ligados con cemento:** El módulo dinámico para materiales cementados, puede ser aproximadamente el doble del módulo estático. Si la frecuencia de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el módulo dinámico aumenta.
- ♦ **Suelos finos:** Manifiestan rigidez mayor en respuesta a cargas dinámicas.

2.6.1.4 Geometría

Los equipos para medir deflexiones cuyos puntos de referencia quedan ubicados dentro del cuenco de deflexiones, generalmente son afectados por el desplazamiento de la superficie del pavimento. Entre ellos se encuentran principalmente los estáticos o de movimiento lento, ya que sus puntos de referencia se desplazan al momento de aplicar la carga, por ejemplo: Viga Benkelman y Deflectómetro Transitivo.

Con el fin de corregir este efecto se realiza una corrección geométrica, la cual tiene por objetivo poder relacionar las medidas de deflexiones que registran los equipos, con la deflexión real del pavimento. A continuación se describe la corrección desarrollada por la Pontificia Universidad Católica de Chile para pavimentos asfálticos en donde se puede encontrar la deflexión absoluta en función de la geometría del dispositivo de medición, de la carga aplicada y del módulo de elasticidad del suelo de fundación [MOP, 1989].

$$d_o = \delta_o - \delta_a + \frac{0,84 W}{a\pi E_s}$$

donde:

d_o = deflexión máxima absoluta.

δ_o = deflexión relativa del punto ubicado bajo la carga, registrado por el dispositivo de medida.

δ_a = deflexión relativa del punto ubicado a una distancia "a", registrado por el dispositivo de medida.

W = carga aplicada por la rueda.
Es = módulo elástico del suelo de fundación.

Los diversos factores que afectan las mediciones, hacen que la comparación entre los distintos equipos sea muy difícil, requiriéndose de regresiones que relacionen sus valores.

2.6.1.6 Aplicaciones de la evaluación estructural en la gestión

La información de deflexiones, como los resultados producto del análisis, tienen una gran variedad de aplicaciones en los distintos niveles de la administración de pavimentos. Siendo estos muy importantes para definir la condición del pavimento a lo largo del proyecto, a fin de determinar áreas que requieran tratamientos u otras opciones de rehabilitación.

2.6.2 Niveles de aplicaciones

Las aplicaciones prácticas de la información proporcionada por la evaluación estructural, pueden ser agrupadas, dependiendo del nivel en el cual se aplique o del objetivo que se persiga con su utilización. A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones [De Solminihaç, 1996].⁷

2.6.2.1 Aplicaciones a nivel de red

Dentro de este nivel se encuentran todas aquellas aplicaciones, orientadas a obtener información sobre el estado de las redes de carreteras y caminos con el fin de poder realizar una buena gestión de ellos.

Identificación de secciones uniformes: La evaluación de los pavimentos permite obtener muy buena información sobre el estado estructural del pavimento y de cada una de sus capas. A través de ello es factible determinar cambios en la capacidad estructural de los tramos, los cuales se pueden deber a:

- Cambio en el tipo de pavimento.
- Deterioro.
- Variación de espesores.
- Cambio de la subrasante.

Características estructurales: Dentro de la información que se obtiene en base a las mediciones, se pueden nombrar algunas que son de mucha importancia al

⁷ Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

momento de caracterizar estructuralmente el estado de un pavimento. Ejemplos de ellos son:

- Deflexión máxima.
- Propiedades de la subrasante.
- Propiedades de las capas superiores.

2.6.2.2 Aplicaciones a nivel de proyecto

En este nivel se incluyen las aplicaciones que se pueden realizar en un proyecto específico, donde se necesita información detallada sobre el estado actual del pavimento. Dicha información es indispensable para poder determinar qué mantenimiento corresponde realizar y en qué momento se debe efectuar. Además, se utiliza para definir los diseños de los diversos mantenimientos estructurales a aplicar.

Caracterización de los materiales de las capas: La caracterización de las capas según sus parámetros de resistencia estructural es indispensable al momento de diseñar una medida de mantenimiento. El FWD permite obtener los parámetros de cada una de las capas, por ejemplo:

- Subrasante (M, valor k).
- Capas superiores (EHOR, EASF, EBASE).

Evaluación estructural: La evaluación estructural permite realizar diversos estudios sobre la capacidad de los pavimentos, entre ellos se encuentran:

- Capacidad estructural.
- Vida remanente.
- Diseño de refuerzos.

Características estructurales de pavimentos de hormigón: En el caso de pavimentos de hormigón, existen estudios específicos que se pueden realizar con el FWD para detectar problemas en las losas. Entre ellos destacan la transferencia de carga y la ubicación y extensión de vacíos.

2.7 Evaluación De La Calidad En Las Diversas Etapas De Construcción

El control se puede realizar en las diversas etapas del proceso constructivo, a través del cual se puede obtener información para definir la uniformidad del proyecto y si se ha cumplido con la capacidad estructural de diseño.

- Mediciones directas sobre la subrasante.
- Mediciones directas sobre la base y subbase (granular o tratada).
- Mediciones sobre la superficie de rodadura.

2.7.1 Seguimiento del comportamiento de los pavimentos

- Con respecto a la administración de los pavimentos a lo largo de su vida, la evaluación estructural permite realizar un seguimiento de ellos para definir cuándo se requieren mantenimientos estructurales.

2.7.2 Estudios especiales

Con equipos de alta precisión, con tecnología de punta en evaluación de pavimentos (como el FWD), es posible realizar una serie de investigaciones en el área de caminos que antiguamente no se podían hacer. A continuación se mencionan algunas de las posibles investigaciones que son factibles de realizar.

- Variación de propiedades a causa de cambios climáticos.
- Estudios de correlaciones.

La gama de aplicaciones de la evaluación estructural es muy amplia, por lo cual es difícil abordarlas todas en profundidad. Se han seleccionado algunas de ellas debido a su importancia, las cuales serán brevemente descritas a continuación.

Con respecto a la caracterización de las capas (retroanálisis) y estudios específicos en pavimentos de hormigón, se recomienda la utilización de equipos como el FWD, dada las características mencionadas anteriormente.

2.7.3 Determinación de tramos en proyectos

Con la información obtenida a partir de las medidas de las deflexiones y el posterior análisis de ellas, se puede evaluar el pavimento a lo largo del proyecto y subdividirlo en tramos de igual resistencia estructural [AASHTO, 1993]. Se pueden determinar tramos que presenten distintos comportamientos estructurales, para lo cual se utilizan los siguientes criterios:

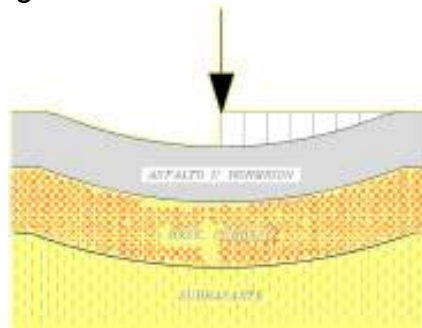
- Dispersión de las mediciones.
- Diferencia en los valores medios obtenidos.

Para realizar la sectorización se pueden utilizar diferentes parámetros, por ejemplo: deflexión máxima (d_o) o el módulo de reacción de la subrasante (valor k).

2.7.3.1 Parámetros utilizados en la caracterización del cuenco de deflexiones

Existen diversos parámetros que se han desarrollado a partir de las mediciones de deflexiones (Figura 6). La mayoría de ellos, pretende otorgar un valor que sea representativo del estado de la estructura del pavimento. En general, estos parámetros no son muy exactos pero sirven para obtener una visión general de un proyecto.⁸

Figura 5 Cuenco de deflexiones.



Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda Edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

Ellos se basan en la forma del cuenco de deflexiones para obtener valores que puedan ser utilizados para determinar cambios en la estructura a lo largo del proyecto en estudio. Ejemplos de ellos se encuentran en la Cuadro 4, donde se muestran los parámetros que son los más utilizados en estos momentos.

Cuadro N° 4 Resumen de parámetros que emplean la información del FWD [Ortiz, 1996]

Parámetro	Fórmula
Deflexión máxima normalizada	$d_{\text{normalizada}} = \frac{d_{\text{carga aplicada}}}{\text{carga normalizada}} \text{ (milts)}$
AREA	$AREA = 6 \left[1 + 2 \frac{d_{\text{a2}}}{d_{\text{a1}}} + 2 \frac{d_{\text{a3}}}{d_{\text{a}}} + \frac{d_{\text{a4}}}{d_{\text{a}}} \right] \text{ (milg.)}$
Índice de curvatura de la superficie	$SCI = d_{\text{a}} - d_{\text{a1}} \text{ (milts)}$

Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

⁸ Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

donde:

$d_0, d_{12}, d_{24}, d_{36}$ = corresponde a las deflexiones medidas a 0, 12, 24, 36 pulgadas, respectivamente.⁹

Todos estos parámetros se tienden a enfocar en cuatro grandes áreas que se describen a continuación:

- Deflexión máxima normalizada: La deflexión máxima corresponde a la deflexión medida por el sensor ubicado bajo el plato de carga. Se normaliza a una carga estándar según la fórmula que se muestra en el Cuadro 1 para poder distinguir y comparar tramos sin la influencia de la variación de la carga entre ensayos. Además debe ser normalizada también con respecto a la temperatura.
- ÁREA: Este parámetro provee una buena estimación de la rigidez relativa de la sección del pavimento, particularmente de las capas ligadas, debido a que es muy insensible a la rigidez de la subrasante.
- Índice de curvatura de la superficie: Permite reflejar la rigidez relativa de las capas superiores de un pavimento.

En muchos casos, el uso de más de un índice puede proporcionar información complementaria para realizar la sectorización. Por ejemplo, en el Cuadro 5 se utiliza la deflexión máxima combinada con el ÁREA para obtener conclusiones generales de la estructura del pavimento.

Cuadro N° 5 Tendencias de d_0 y el valor de ÁREA (Dynatest y SME, 1994).

Parámetros basados en el FWD		Conclusiones generales
ÁREA	Máxima deflexión (D_0)	
Bajo	Bajo	Estructura débil, subrasante fuerte
Bajo	Alto	Estructura débil, subrasante débil
Alto	Bajo	Estructura fuerte, subrasante fuerte
Alto	Alto	Estructura fuerte, subrasante débil

Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

⁹ Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

2.7.4 Deflexión central D_0

La evaluación de la capacidad estructural de un pavimento, se puede obtener mediante la medición de deflexiones y a partir de tales resultados se logra inferir las variables fundamentales para el diagnóstico, análisis y/o diseño del refuerzo de la estructura de pavimento, que soporte las cargas de tráfico en el periodo de diseño.

El análisis de la estructura existente puede realizarse más fácilmente de manera confiable, mediante la utilización del deflectómetro de impacto, el cual permite aplicar una carga estandarizada sobre el pavimento y determinar a partir del cuenco de deflexiones, las variables estructurales.

Las variables del pavimento son: módulo resiliente M_r , módulo equivalente de los materiales de la estructura de pavimento existente E_p y el número estructural SN, todo bajo la metodología AASHTO–93. Estas variables son fundamentales para la determinación del diagnóstico estructural.

Las mediciones consisten en aplicar una carga dinámica de 40 KN, generada por la caída de una doble masa sobre un plato circular cuya superficie de contacto se asemeja al de la rueda de un camión. El deflectómetro registra la fuerza de impacto, la temperatura de ensayo, tanto del aire como del pavimento y los máximos de deformación registrados mediante los sismómetros.

Mediante la automatización del sistema, el ciclo de trabajo puede llevarse a cabo hasta en un tiempo mínimo de 60 segundos por punto, lo cual lo convierte en un equipo de gran rendimiento y especialmente útil en la auscultación de pavimento existente.

Las deflexiones de campo se consideran normalizadas, una vez se estandarizan a una carga de 40 KN y a una temperatura de 20°C, según la metodología AASHTO.

2.7.5 Módulo resiliente de la subrasante M_r

La guía de diseño de la AASHTO presenta la metodología para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante (M_r) a partir de medidas de deflexión tomadas con el Falling Weight Deflectometer¹⁰.

El cálculo del Módulo es como $M_r = \frac{0.24 * P}{d_r * r}$ sigue:
Donde:

¹⁰ AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. Página III-91.

M_r - Módulo resiliente de la subrasante, en psi

P - Carga aplicada (libras). (9000 libras = 40 kN)

d_r - deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, en pulgadas.

r - Distancia desde el centro del plato de carga, en pulgadas.

Para efectos de diseño, éste módulo debe multiplicarse por un factor de 0.33, para

obtener un valor representativo de diseño: $M_r = 0.33 \left(\frac{0.24 \cdot P}{d_r \cdot r} \right)$

2.7.6 Módulo equivalente del pavimento E_p

El módulo equivalente del pavimento, muestra la capacidad de la estructura existente, es decir, la capa asfáltica que la conforma y los materiales que se encuentran debajo de éste. La obtención del módulo equivalente se realizó a partir de la metodología de la AASHTO haciendo uso de las deflexiones llevadas a cabo con el Deflectómetro de Impacto FWD.

El cálculo del módulo equivalente de la estructura de pavimento se obtuvo a partir de la siguiente fórmula¹¹:

$$d_0 = 1.5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \left[\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right] \right\}$$

Donde:

D_0 - Deflexión central.

¹¹ AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. Página III-97.

p - Presión del plato de carga, en psi. En este caso igual a 82.3 psi = 5.76 Kg/cm².
a - Radio del plato de carga, en pulgadas. (5.9 pulgadas = 0.15 m)
D - Espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, en pulgadas,
M_r - Módulo resiliente de la subrasante, en psi.
E_p - Módulo efectivo de todas las capas del pavimento, en psi.

2.7.7 Número estructural SN

La variable más importante en la metodología AASHTO para dimensionar espesores de refuerzo es el Número Estructural SN. Este valor junto con la proyección de tránsito en el período de diseño, permite determinar espesores de refuerzo en cualquier etapa del tiempo estimado. La situación futura de la vía, por lo tanto, estará condicionada de manera importante a las cargas y al tipo de tránsito futuro.

Basándose en la metodología ASSTHO, el cálculo del SN_{efectivo} se realiza mediante la siguiente fórmula:¹²

$$SN_{Efectivo} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{E_p}$$

2.7.8 Retrocálculo de módulos.

Basado en el cuenco de deflexiones que se obtiene a partir de las medidas realizadas con el Deflectómetro de impacto, FWD y con los calibres de las diferentes estratos que integran la esqueleto de pavimento, se establecieron mediante retrocálculo los módulos de las capas de las estructuras de pavimento existente, empleando la herramienta computacional EVERCALC 5.0.

Mediante el retrocálculo se indaga el acierto entre el cuenco de deflexión que se halló en las mediciones efectuadas con el deflectómetro de impacto y el deducido mediante la empleo de la teoría elástica, en este caso, por intermedio del programa EVERCALC 5.0., se estableció si existe o no una adecuada convergencia. El parámetro empleado fue la de la raíz del error medio cuadrático (RMS – Root Mean Square).

2.7.9 Corrección de módulos para el diseño de la rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras basado en la guía metodológica

Posteriormente al retrocálculo de los módulos, se realizó el ajuste de los datos obtenidos, por medio de la metodología establecida en la “Guía Metodológica Para

¹² AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. Página III-97.

el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras”, con el fin de caracterizar de las capas asfálticas.

Teniendo en cuenta que los módulos dinámicos de las capas asfálticas dependen de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga, en el modelo mecanicista, la sobrecapa asfáltica debe ser modelada con la temperatura promedio ponderada del pavimento (TPPP) del sitio.

La determinación de las capas asfálticas que se encuentran en la vía depende del nivel de destrucción en que se hallan. Por lo anterior la magnitud del módulo varía en gran medida basado en estado del deterioro y debe asemejarse al hallado a través del retrocálculo mediante las cantidades obtenidas a través de la deflexión.

Los valores deben ser ajustados si el gradiente térmico del pavimento en el momento en que se realizaron las medidas de deflexión difiere con el de la TPPP del lugar.

Basado en la temperatura media anual ponderada de las capas asfálticas y con la temperatura de las capas asfálticas en el instante de la medición, se efectuó el ajuste de los módulos de las capas asfálticas, encontrados a partir de retrocálculo según el juicio de la Guía Metodológica.

2.8 Módulo Resiliente Obtenido A Partir De Ensayos De Laboratorio

El equipo Nottingham Asphalt Tester (N. A. T.) fue diseñado por la empresa “COOPER RESEARCH TECHNOLOGY para evaluar las propiedades mecánicas de materiales; esta máquina permite la realización de nuevos diseños, la caracterización de nuevos materiales, la valoración de pavimentos en servicio y el control de calidad entre otras aplicaciones.

El N. A. T. utiliza un computador por medio de una interfaz de adquisición de datos para realizar las pruebas y procesar los datos obtenidos de los ensayos dinámicos, para este fin utiliza un Software especialmente desarrollado, que guía al usuario paso a paso en cada procedimiento.

El objetivo del ensayo es determinar dos valores de módulos resilientes: **el modulo resiliente instantáneo**, que se calcula determinado la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante parte de la descarga de un ciclo y **el modulo resiliente total** que se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye la deformación recuperable instantánea como la deformación recuperable dependiente del tiempo, que continua durante la descarga y el resto del periodo de un ciclo. El ensayo se lleva a cabo aplicando cargas de compresión de forma ondulada.

Para encontrar este módulo se emplea el ensayo de tensión indirecta, descrito el proceso dado en la metodología anterior. Originalmente se introducen las muestras de ensayo en una cámara que controla la temperatura transbordándola a la temperatura deseada el cual debe actuar dentro de un intervalo de temperaturas desde 5° hasta 40° C (41° a 100° F) y con exactitud de $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{F}$) de la temperatura especificada dentro del intervalo. Se deben colocar al menos 3 muestras durante un tiempo de 24 horas, antes del ensayo.

Se coloca el espécimen dentro de un equipo conocido como NAT (Nottingham asphalt test.) El cual permite obtener los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas.¹³

Figura 6 *Equipo NAT.*



Fuente: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis113.pdf>

Se deben ubicar en posición para que las tiras de carga sean afines y queden ajustadas respecto al plano diametral vertical.

Después se aplica, una fuerza repetida con forma de onda adecuada a la muestra, sin impacto en un tiempo mínimo, suficiente para obtener una lectura de deformación uniforme.

De acuerdo con la frecuencia y la temperatura de carga, una repetición mínima de carga de 50 a 200 N es típica; sin embargo, el mínimo para una situación dada

¹³ Fuente: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis113.pdf>.

debe determinarse de tal manera que las deformaciones resilientes sean estables, tan pocas como 5 repeticiones de carga han sido encontradas suficientes para cargas tales como 22,30 y 111.20 N.

La evaluación del módulo resiliente comúnmente incluye ensayos a tres (3) temperaturas, por ejemplo: 5. ± 1.8 , 25 ± 1.8 , 40 ± 1.8 °C, a una o más frecuencias de carga, por ejemplo .33, 0.5 y Hz para cada temperatura. El intervalo recomendado de carga es el que induzca del 10 al 50% de la resistencia a la tensión. A continuación se controlan las deformaciones horizontales y se miden, las verticales durante el ensayo. Si una deformación vertical acumulada mayor 0.25 mm ocurre durante el ensayo se reduce la carga aplicada, la temperatura del ensayo o ambas.

Cada determinación del modulo resiliente deberá contemplarse cada 4 minutos, a partir del momento en que la muestras son removidos del equipo NAT. El tiempo límite de cada ensayo es de 4 minutos y es dejado de lado, si la carga se efectúa dentro de un gabinete de control de temperatura, tal como lo hace el equipo NAT. Seguidamente, se ensaya cada espécimen para el modo resiliente dos (2) veces. Después del primer ensayo se cambia el prototipo en el NAT, durante 10 mm se continúa el ensayo rotando el prototipo aproximadamente 90° y se repite el ensayo. Se recomiendan tres elementos para cada serie dada de ensayos con variables de temperatura, duración y frecuencia de carga. Para reducir el daño frecuente de la muestra, luego del ensayo, debe iniciar a la temperatura más baja, la duración de carga y con la carga más pequeña. El ensayo subsiguiente sobre el mismo espécimen, deberá ser para condiciones que produzcan progresivamente módulos más bajos.

Para finalizar, se miden las deformaciones recuperables promedio horizontales y verticales, durante al menos tres ciclos de carga, después de que la deformación repetida resiliente haya llegado a ser estable. Las medidas de deformación vertical pueden omitirse cuando la relación de Poisson no se vaya a determinar.

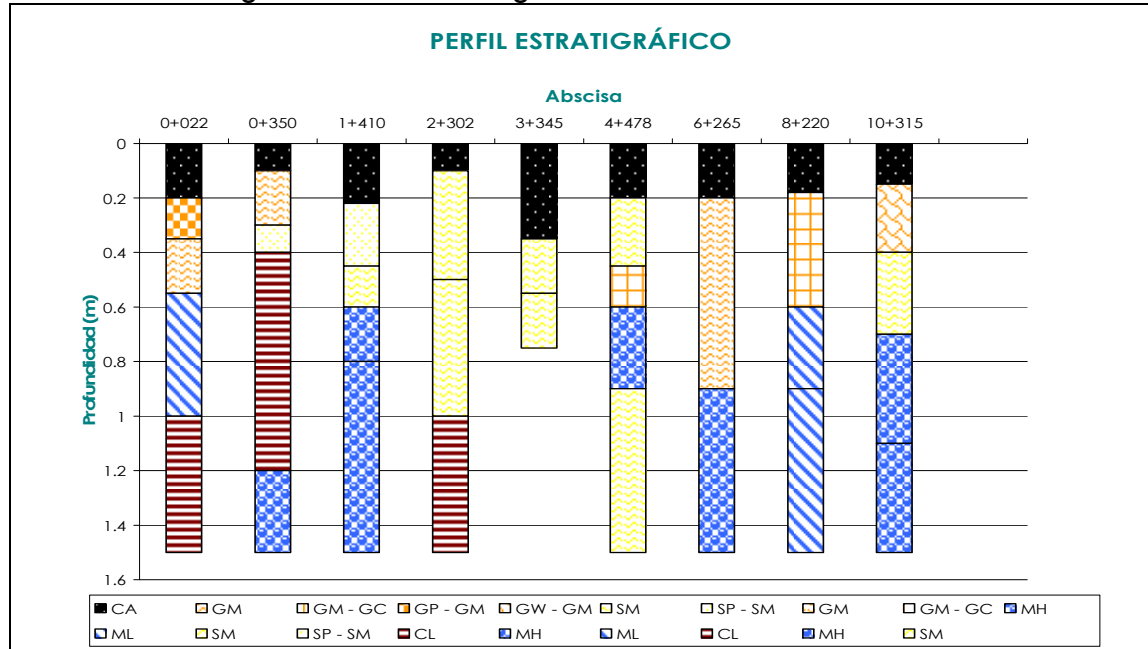
2. 9 Características del corredor

El estudio geotécnico fue realizado por la empresa AUSCULTAR LTDA, con perforaciones a lo largo de la vía en intervalos de aproximadamente 1200 metros, para un total de 9 apiques.

En el Anexo 1 se presenta la tabla resumen con los datos obtenidos de los 9 apiques ejecutados, mostrando los espesores de los materiales existentes y resultados de todos los ensayos de laboratorio.

A continuación se presenta el perfil estratigráfico de la vía El Portal - El Antojito.

Figura 7 Perfil Estratigráfico PR0+000 al PR11+150



Fuente: Autores del presente estudio

Del perfil estratigráfico se define en términos generales una estructura de pavimento flexible, con espesores de carpeta asfáltica que oscila entre 0.10 m y 0.35 m, apoyada principalmente sobre materiales gravosos con arenas y en algunos casos materiales cohesivos, con espesores entre 0.35 m y 0.90 m. La subrasante está compuesta por limos y arcillas de baja y alta plasticidad.

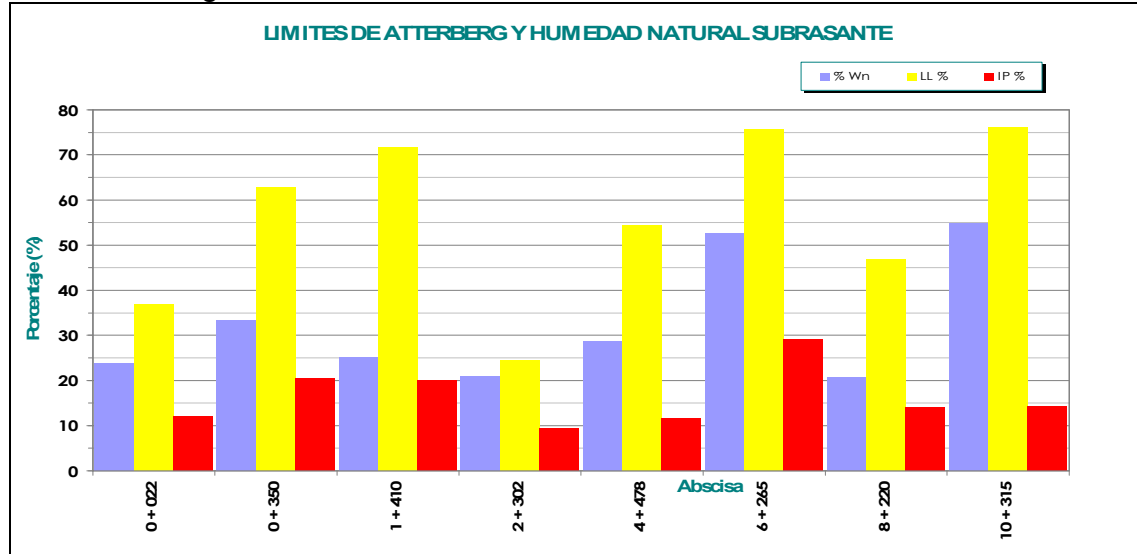
Es importante anotar que la carpeta asfáltica existente se encuentra en pobres condiciones por la existencia de daños estructurales.

A continuación se presenta una descripción de los resultados de cada una de las capas de materiales que componen la estructura existente de este sector.

2.10 EVALUACIÓN DE LA SUBRASANTE

La subrasante del corredor, está compuesta por limos de baja plasticidad, limos inorgánicos y arenas muy finas de consistencia media así como arcillas de baja plasticidad, arcillas gravosas y arenas limosas de consistencia baja.

Figura 8 Características de Plasticidad de la Subrasante



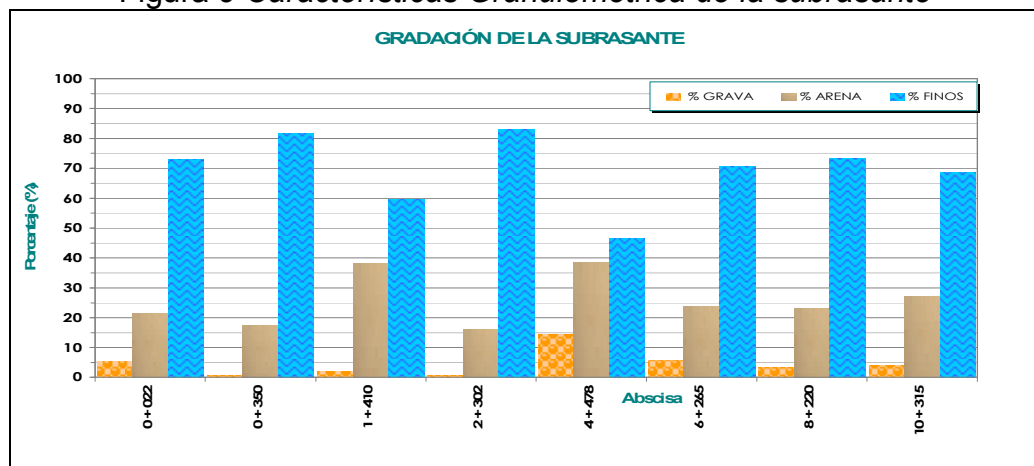
Fuente: Autores del presente estudio

En la figura 9 se observa que los materiales de la subrasante tienen una plasticidad baja y alta, con límite líquido superior del 50%, sin embargo se observa que el índice de plasticidad no supera el 30%, lo cual indica que los suelos no son potencialmente expansivos.

La humedad natural reportada en el corredor, se presenta en un rango de 20.6% y 54.9%, con un valor promedio de 32.5%.

Las características granulométricas de la subrasante, se pueden observar en la siguiente figura:

Figura 9 Características Granulométrica de la subrasante

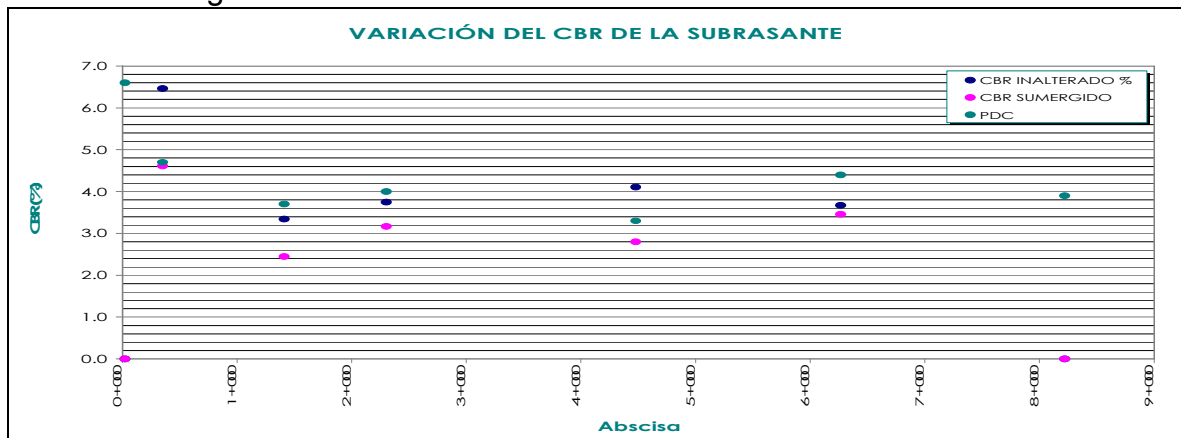


Fuente: Autores del presente estudio

De acuerdo con lo observado en la gráfica se evidencia el predominio de materiales finos tipo limos y arcillas de baja compresibilidad a lo largo del sector, el porcentaje de finos promedio de la subrasante es de 69.7%.

Se efectuaron ensayos de CBR en estado sumergido, inalterado y penetración dinámica de cono, los resultados se muestran en la siguiente figura:

Figura 10 Características Granulométrica de la subrasante



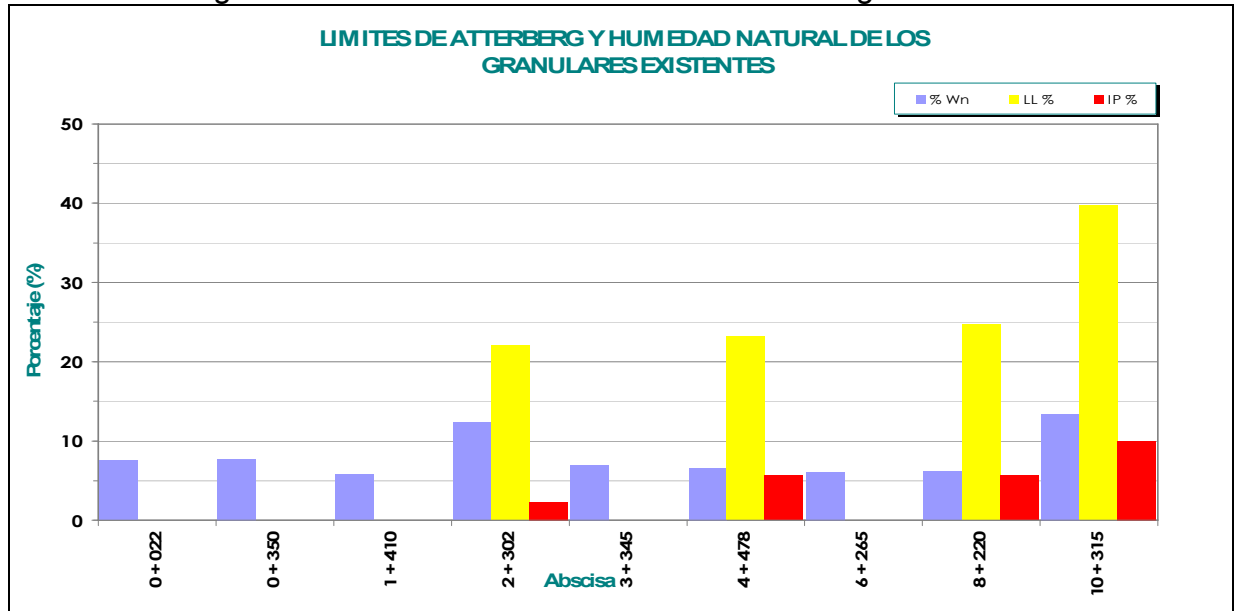
Fuente: Autores del presente estudio

Los valores de CBR inalterados para el corredor oscilan entre 3.34 y 6.46%, de los cuales se puede interpretar la existencia de una subrasante con capacidad de soporte de pobre a regular, no adecuada para las exigencias de la vía.

2.11 EVALUACIÓN DE LOS GRANULARES

Se muestran a continuación las características de plasticidad de los granulares existentes en la vía.

Figura 11 Características de Plasticidad de los granulares



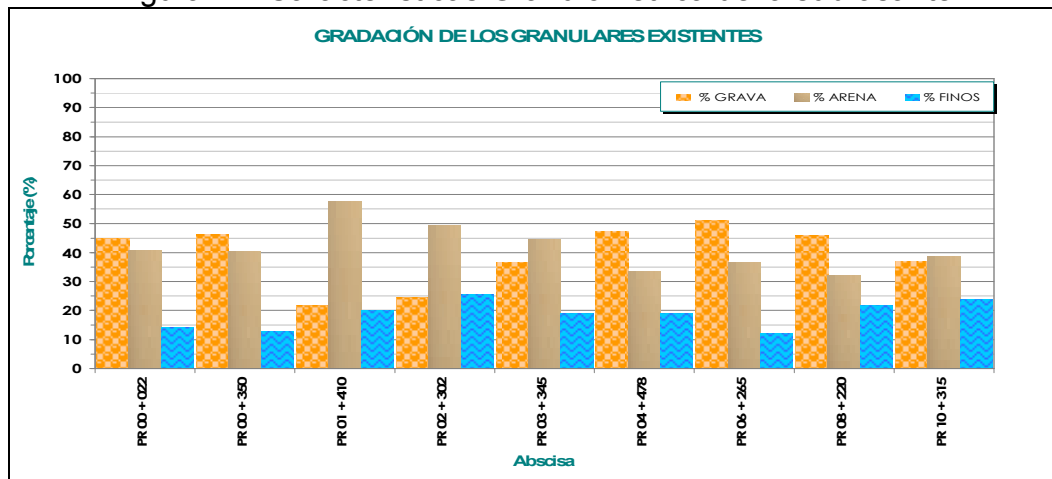
Fuente: Autores del presente estudio

En esta gráfica se observa la presencia de materiales con baja plasticidad, al presentar un índice plástico menor al 10% y límite plástico inferior al 50%.

Del PR0+000 al PR2+300, el comportamiento de los granulares es no plástico y posteriormente presenta un índice de plasticidad promedio de 5.9%. La humedad natural promedio de los granulares es de 8.1%.

Se muestran a continuación las características granulométricas de los materiales granulares.

Figura 12 Características Granulométrica de la subrasante



Fuente: Autores del presente estudio

La figura 12 muestra las propiedades variables del material granular en todo el tramo, con un porcentaje de gravas entre el 21.9% y 51.2%.

El porcentaje de finos está en un rango entre 12.2% y 25.6%, con un valor promedio de 19.5%.

Esta carretera fue construida por el antiguo Ministerio de Obras Públicas hace bastante tiempo, razón por la cual el material granular que conforma su estructura es de baja especificación, condición que no se ajusta a las actuales especificaciones del INVIAS, para materiales de base o subbase granular, puesto que reporta un porcentaje de finos mayor al 15%. Prácticamente se considera que la capa asfáltica existente, se apoya sobre un material seleccionado o de afirmado, condición que justifica el alto espesor que presenta la estructura, producto de las capas de refuerzo que se han colocado en algunos tramos a lo largo del tiempo como la única solución.

3. METODOLOGÍA

La evaluación de las estructuras de los pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad soporte del sistema pavimento - subrasante en una vía existente, en cualquier momento de su etapa de uso, para constituir y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función. Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

Ante la evaluación estructural, el Ingeniero tradicionalmente ha recurrido a realizar apiques, para tomar muestras y elaborar ensayos en el laboratorio, y analizar sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) con el fin de deducir las características estructurales del mismo. Las perforaciones son costosas, lentas, alteran el equilibrio del sistema que caracteriza una metodología "destruktiva".

Otro método de evaluación estructural se realiza mediante deflexiones medidas en la superficie del pavimento. Estas reflejan la respuesta global del sistema bajo una carga dada. Su medición es simple, rápida y "no destructiva", es decir, no se alteran el equilibrio ni su integridad, igualmente se caracteriza por ser un ensayo económico.

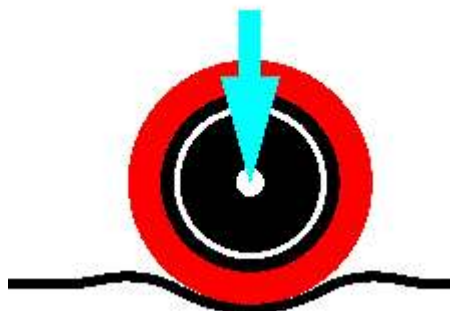
La metodología no destructiva se basa en las mediciones de las deformaciones generadas por la excitación del impacto sobre la superficie del pavimento, estas generan la forma y tamaño de la curva de deflexión que contiene una valiosa información acerca de las características estructurales. Para interpretar esta información en forma cuantitativa, se compara los datos obtenidos en campo con un modelo matemático para determinar los parámetros estructurales del sistema. Una vez determinados estos parámetros, pueden usarse como insumo para establecer las necesidades de refuerzo. Podría decirse entonces que la metodología de evaluación estructural, por métodos no destructivos, es un proceso de diseño inverso (Retrocálculo), ya que utiliza las condiciones reales de la estructura para obtener los parámetros iniciales de diseño.

3.1 LA DEFLEXIÓN COMO PARÁMETRO DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Deflexión¹⁴ es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga, lo que se debe no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también al método y equipo de medida. La medición de la deflexión, se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

En la Figura 5 se puede apreciar el efecto que causa la rueda sobre el pavimento cuando pasa un vehículo, el desplazamiento vertical de la superficie corresponde a la deflexión. Es importante resaltar que no sólo se desplaza el punto bajo la carga, sino que un sector alrededor de ella también es desplazado, causando un conjunto de deflexiones, que se denominan cuenco.

Figura 13 Esquema de la deflexión de un pavimento flexible



Fuente: SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

Un cuenco de deflexiones de un pavimento se puede medir utilizando diferentes equipos. El procedimiento consiste en aplicar una carga sobre el pavimento, midiendo la deformación producida en la superficie de él, en distintos puntos ubicados a diferentes distancias de la carga.

Anteriormente la información de deflexiones, se refería principalmente a la deflexión máxima bajo la carga, normalmente se consideraba un nivel de deflexión tolerable para una sección de pavimento, bajo un tráfico determinado. Por otra parte, se utilizaba un refuerzo para llevar las deflexiones a un nivel tolerable¹⁵. Actualmente el análisis y diseño mecanicista de los pavimentos, basado en los principios fundamentales de la física, ha permitido que el uso de la información de deflexión se haya vuelto más sofisticado. En la actualidad, las mediciones de

¹⁴ SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

¹⁵ Ejemplos de ello se incluyen en The Asphalt Institute MS-17 [The Asphalt Institute, 1983].

deflexiones tienen diversos usos [Dynatest y SME, 1994; Hall, K. y Steele, D., 1995]:

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de las zonas débiles y/o deterioradas.
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de refuerzos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimientos para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la gestión de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.
- Evaluación de la transferencia de carga en pavimentos rígidos

3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

En la ingeniería actual existe una amplia gama de métodos de evaluación, lo que dificulta establecer cuales técnicas y equipos de medida son más recomendables y cual es la frecuencia mínima necesaria o posible con los medios disponibles, sin contar con el hecho de que todavía no se ha logrado a nivel mundial, el desarrollo de técnicas de medida de gran velocidad.

Existen diversos métodos para medir la deflexión de un pavimento, por tal razón también hay muchas clasificaciones. Las más importantes son: la posición donde se mide, la forma como se aplica la carga, además del tipo y número de sensores para realizar las mediciones. A continuación se señalan algunas clasificaciones: [Lytton, 1988].

- Lugar donde se realizan las mediciones: dentro del cuenco, fuera del cuenco.
- Forma de aplicar la carga: estática o de movimiento lento.
- Vibración.
- Impacto.

- Propagación de ondas.
- Tipos de sensores.
- Geófonos, miden la velocidad del sonido de la onda en la superficie del pavimento.
- Acelerómetros, miden la aceleración y desaceleración en el comportamiento de la onda en la superficie del pavimento.
- Transformadores diferenciales de voltaje lineal (LVDT), los cuales miden la propagación de la onda en la superficie del pavimento.

La clasificación más usada tiene que ver con el tipo de carga, a continuación se describen las distintas categorías.

4. CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

4.1 DEFLEXIÓN CENTRAL D_0

En este estudio se utilizó el deflectómetro de impacto FWD KUAB 50 2m.

En las siguientes fotografías se puede apreciar el deflectómetro de impacto FWD KUAB 50 2m y las condiciones de seguridad implementada durante su operación y transporte.



Fotografía No. 4 Deflectómetro de impacto FWD KUAB 50 2m.



Fotografía No. 5 Vista lateral del deflectómetro de impacto FWD KUAB 50 2m.



Fotografía No. 6 Señalización utilizada durante la medición y así prevenir a los conductores durante la medición.



Fotografía No. 7 sismómetros del FWD KUAB 50 2M

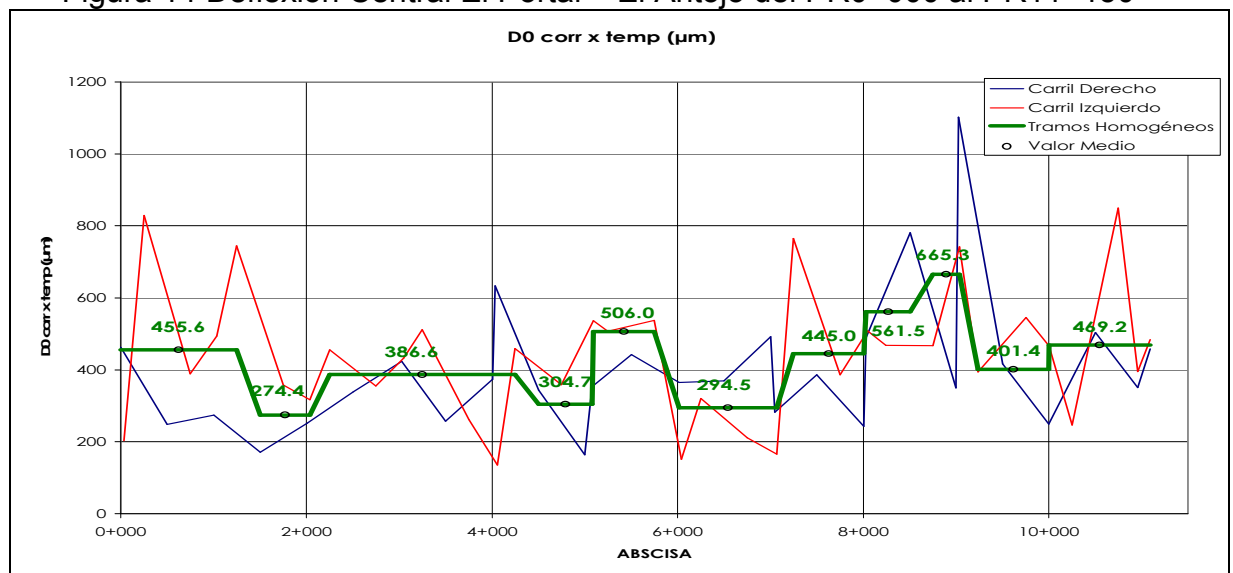
Fuente: Autores del presente estudio

Las deflexiones que se muestran en este numeral se encuentran normalizadas por carga y por temperatura a 20°C.

Los resultados de deflectometría para el corredor fueron obtenidos a partir de las expresiones consignadas en el marco teórico y se encuentran en el Anexo 2. Sin embargo, a continuación se muestran los resultados de la deflexión central.

A continuación se presenta la figura 14, con los resultados de la deflexión central de la carretera Portal – El Antojito del PR0+000 al PR11+150

Figura 14 Deflexión Central El Portal – El Antojito del PR0+000 al PR11+150



Fuente: Autores del presente estudio

Las deflexiones que se muestran en este numeral se encuentran normalizadas por carga y por temperatura a 20°C.

Nótese en la Figura 14 que las deflexiones registradas en los dos carriles son muy similares, lo cual es consecuente con la distribución direccional del tránsito del corredor.

La deflexión central promedio de este tramo es de 422 (1/1000 mm) considerándose como aceptable en términos generales; el valor mínimo de la deflexión central reportado es de 136 (1/1000 mm) y el máximo es de 1102 (1/1000 mm), lo cual indica la existencia de sectores entre mala y buena la capacidad estructural, desde el punto de vista de la respuesta ante una carga, en este caso la deflexión central.

A continuación se presentan los resultados de la deflexión central D_0 en forma tabulada indicado el valor promedio, máximo, mínimo y coeficiente de variación.

Cuadro No. 6 Deflexión central Carretera El Portal –El Antojito

Tramo	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Varianza
1	0	1,243	829.4	202.6	455.6	229.7	0.50
2	1,243	2,036	357.8	171.4	274.4	81.4	0.30
3	2,036	4,248	633.3	135.9	386.6	130.9	0.34
4	4,248	5,078	358.2	164.0	304.7	94.0	0.31
5	5,078	5,749	538.2	442.6	506.0	44.5	0.09
6	5,749	7,069	491.6	151.0	294.5	116.1	0.39
7	7,069	8,005	764.9	243.1	445.0	223.6	0.50
8	8,005	8,508	780.6	468.2	561.5	146.9	0.26
9	8,508	9,039	1,102.3	349.7	665.3	334.6	0.50
10	9,039	10,001	545.2	249.4	401.4	121.2	0.30
11	10,001	11,150	849.5	246.5	469.2	175.4	0.37

Fuente: Autores del presente estudio

Se considera demasiado heterogéneo los tramos 1, 7 y 9 mientras que los demás pueden considerarse homogéneos.

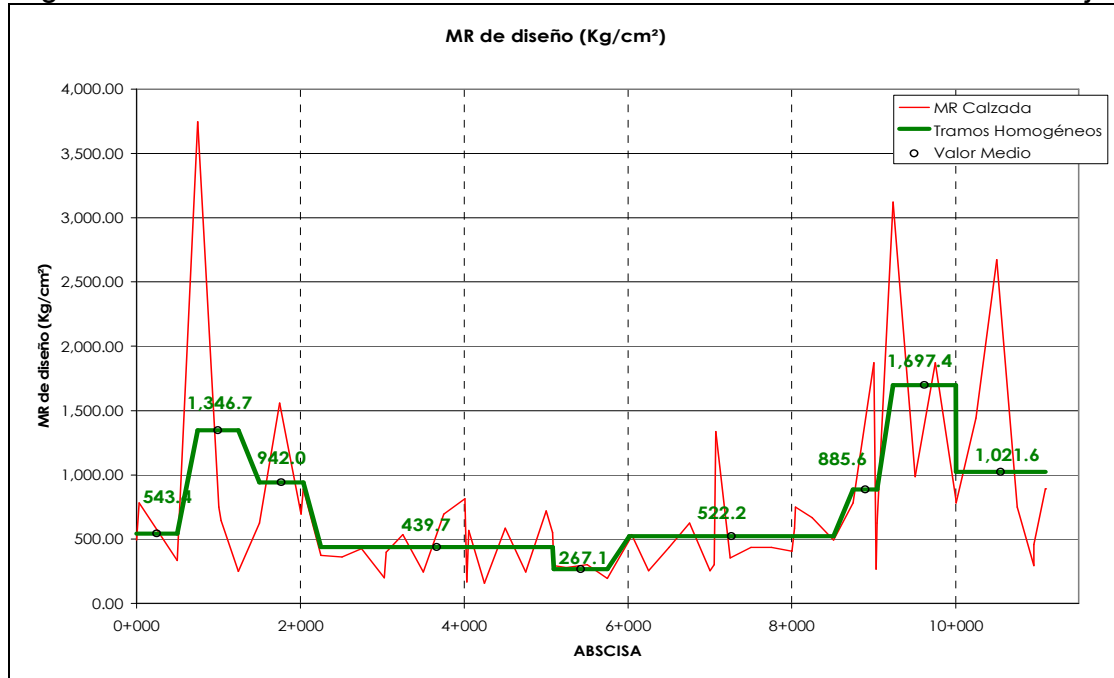
4.2 CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE M_R

Los resultados del módulo resiliente para el corredor El Portal –El Antojito se obtuvieron a partir de las expresiones tal como lo describe el marco teórico del presente estudio, estos datos se encuentran incluidos en el Anexo 3 del presente informe.

A continuación se muestran en la figura 14 el comportamiento de los suelos de subrasante a lo largo del corredor en estudio.

En la figura 15 se puede observar que los valores más bajos de módulo resiliente se encuentran entre el PR2+250 al PR5+400, con resultados de 267 a 439.7 Kg/cm². La zona de mejor comportamiento de subrasante se encuentra entre el PR9+200 al PR10+000 con módulo resiliente promedio de 1697.4 Kg/cm².

Figura 15 Módulo Resiliente de la Subrasante Carretera El Portal – El Antiojo



Fuente: Autores del presente estudio

A continuación en la cuadro No. 7 se muestra los módulos resilientes de la subrasante por tramos homogéneos.

Cuadro No. 7 Módulos Resilientes de subrasante Portal- El Antiojo (Ambos Carriles)

TRAMO	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	MÁXIMO	MÍNIMO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIANZA
1	0	498	779.8	334.2	543.4	185.1	0.34
2	498	1,243	3,743.1	249.5	1,346.7	1,612.1	1.20
3	1,243	2,036	1,559.6	623.9	942.0	427.1	0.45
4	2,036	5,078	813.7	156.0	439.7	206.9	0.47
5	5,078	5,749	301.9	195.0	267.1	49.0	0.18
6	5,749	8,508	1,336.8	252.9	522.2	259.6	0.50
7	8,508	9,039	1,871.6	267.4	885.6	691.4	0.78
8	9,039	10,001	3,119.3	813.7	1,697.4	1,055.2	0.62
9	10,001	11,150	2,673.7	292.4	1,021.6	748.5	0.73

Fuente: Autores del presente estudio

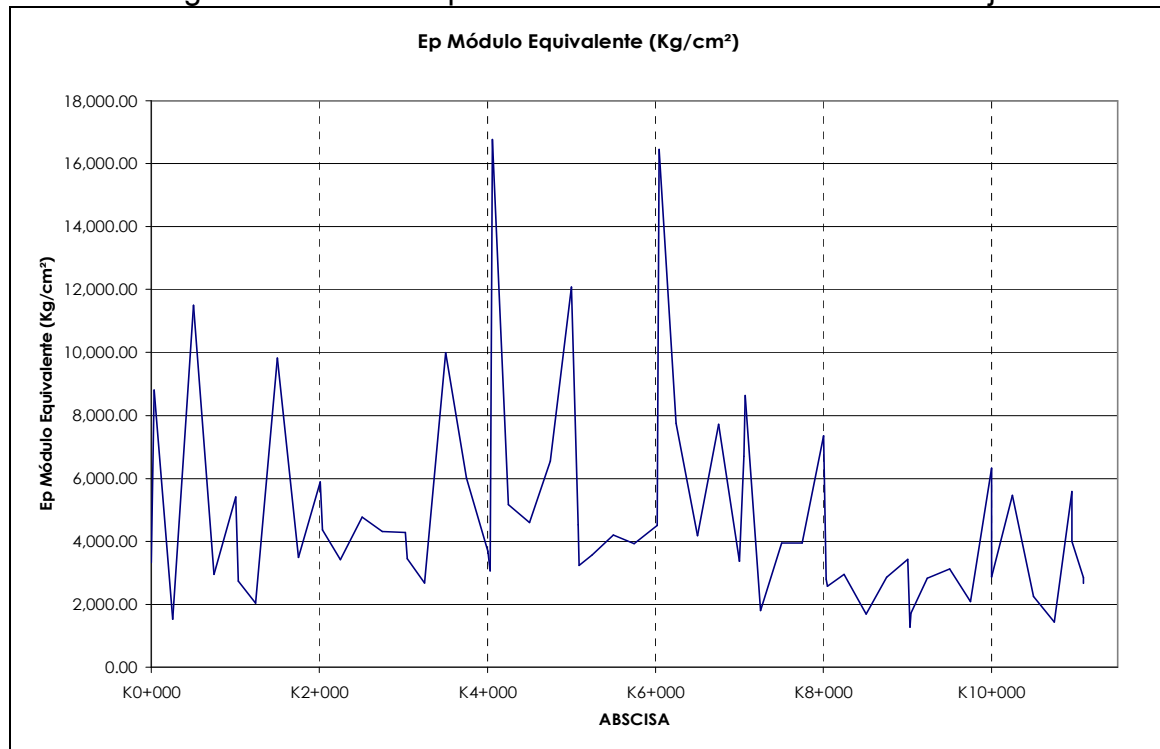
En estos datos se puede observar que la totalidad del corredor vial, presenta una subrasante con valores de modulos resilientes bajos y medios, los valores mayores de MR son producto de una estructura de pavimento que posee gran espesor de carpeta asfáltica y material granular remanente.

4.3 CÁLCULO DEL MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO EP

El cálculo del módulo equivalente E_p de toda la estructura de pavimento para la carretera El Portal - El Antojito, se encuentra incluido en el Anexo 3.

En la Figura 15 se muestran los resultados del módulo equivalente del pavimento para la carretera El Portal-El Antojito. Los índices obtenidos indican en este caso, que a mayor módulo, mayor capacidad estructural del sector, sin embargo, también puede deducirse que a mayor módulo, mayor rigidez y por lo tanto es más factible que aparezca la condición de fatiga en las capas asfálticas.

Figura 15 Módulo Equivalente Carretera El Portal - El Antojito



Fuente: Autores del presente estudio

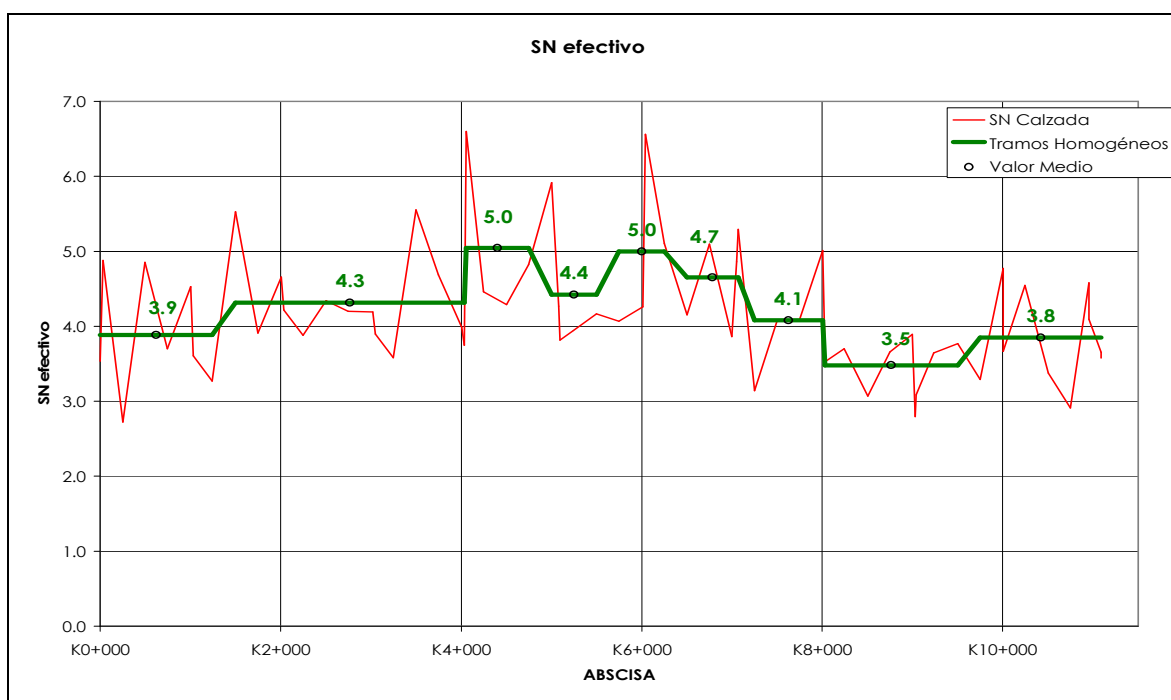
El valor de módulo equivalente promedio de toda la vía es de 4833 Kg/cm^2 . Los valores de E_p son variables en el corredor, reportando un rango entre 1276 y 16776 Kg/cm^2 .

4.4 NÚMERO ESTRUCTURAL SN

Los resultados del número estructural efectivo para la carretera El Portal- El Antiojo se encuentran incluidos en el Anexo 3 del presente informe.

A continuación se presentará de forma general el comportamiento del pavimento a partir de la variable SN a lo largo de la vía.

Figura 16 Número estructural SN Carretera El Portal –El Antiojo



Fuente: Autores del presente estudio

El comportamiento es favorable desde el punto de vista estructural, se observa que los tramos del PR4+050 al PR4+750 y del PR5+750 al PR6+250 presentan los mayores valores de SN efectivo con un valor medio de 5.0 y entre el PR8+050 al PR9+5000 se obtienen el menor valor promedio de SN de 4.35.

A continuación en el cuadro No. 9, Se observan los valores de número estructural de la carretera en estudio para los sectores homogéneos.

Cuadro No. 8 Número Estructural Carretera El Portal-El Antojito – Ambos carriles

Tramo	Calzada	ABSCISA INICIAL	ABSCISA FINAL	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Varianza
1	ÚNICA	0	1,243	4.9	2.7	3.9	0.8	0.20
2	ÚNICA	1,243	4,033	5.6	3.6	4.3	0.6	0.14
3	ÚNICA	4,033	4,749	6.6	4.3	5.0	1.1	0.21
4	ÚNICA	4,749	5,500	5.9	3.8	4.4	0.9	0.19
5	ÚNICA	5,500	6,249	6.6	4.1	5.0	1.1	0.23
6	ÚNICA	6,249	7,069	5.3	3.9	4.7	0.6	0.13
7	ÚNICA	7,069	8,005	5.0	3.1	4.1	0.8	0.19
8	ÚNICA	8,005	9,503	3.9	2.8	3.5	0.4	0.10
9	ÚNICA	9,503	11,150	4.8	2.9	3.8	0.6	0.16

Fuente: Autores del presente estudio

Del cuadro anterior se puede decir que existe una baja variabilidad del número estructural SN a lo largo de la vía.

4.5 MÓDULO RESILIENTE OBTENIDO EN EL LABORATORIO

Para obtener estos resultados se tomaron dos muestras en los PR de la carretera El Portal - El Antojito y se llevaron al Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, resultados que se relacionan en el Anexo N° 6.

4.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Cuadro No. 9 Comparación de módulos resilientes

ABSCISA	MR OBTENIDO CON FWD [MPa]	MR OBTENIDO EN LABORATORIO [MPa]	RELACIÓN ENTRE MÓDULOS	COMPARACIÓN DE RESULTADOS
PR 0 +0027	78,00	75,55	96,86%	Son parecidos
PR 1+0400	62,40	47,17	64,38%	Diferentes

Para la comparación realizada en el primer punto PR 0+0027 los resultados son muy parecidos, sin embargo en el segundo sitio evaluado con muestras inalteradas, la relación entre los módulos resilientes es bastante considerable dado que el coeficiente en este caso debe afectarse por un factor de 0.64

CONCLUSIONES

Debido a la heterogeneidad del suelo de la vía en estudio, se producen diferencias en los resultados, lo cual afecta directamente el módulo resiliente de la subrasante, reflejando que esta magnitud no es constante, motivando al desarrollo de nuevos análisis basados en estudios complementarios.

Los ensayos fueron realizados para condiciones físicas del suelo bastante similares y estados de esfuerzos equivalentes, por lo cual los valores de módulo resiliente determinados en laboratorio y mediante Deflectómetro de Impacto resultan comparables.

Al comparar el módulo resiliente obtenido en el laboratorio versus el módulo resiliente calculado por deflectometría, en la abscisa PR0+0027, los valores son muy similares con apenas una diferencia de 3.14%. sin embargo, en el PR1+0400 la diferencia de dichos módulos es notablemente mayor del 35.62%.

ABSCISA	MR OBTENIDO CON FWD [MPa]	MR OBTENIDO EN LABORATORIO [MPa]	RELACIÓN ENTRE MÓDULOS	COMPARACIÓN DE RESULTADOS
PR 0 +0027	78,00	75,55	96,86%	Son parecidos
PR 1+0400	62,40	47,17	64,38%	Diferentes

Para la comparación realizada en el primer punto PR 0+0027 los resultados son muy parecidos, sin embargo en el segundo sitio evaluado con muestras inalteradas, la relación entre los módulos resilientes es bastante considerable dado que el coeficiente en este caso debe afectarse por un factor de 0.64

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar el presente estudio, llevando a cabo la comparación de los módulos de laboratorio frente a los módulos de retro cálculo, para ello se deben realizar más ensayos de laboratorio con el fin de tener mejores referencias para obtener una ecuación que correlacione las variables fundamentales para el diseño del pavimento.
- Lo ideal de este estudio es que se hubiese tenido más ensayos de laboratorio, en lo posible uno para cada medición de deflexión FWD; sin embargo, los costos que acarrea la elaboración de módulos para cada punto serían demasiado altos, por lo tanto se debe buscar la manera de encontrar un modelo que facilite la correlación de los datos obtenidos a través de ensayos no destructivos.
- Se recomienda que la Nación a través del Instituto Nacional de Vías INVIAS y el Instituto Nacional de Concesiones INCO, implementen laboratorios para que se facilite la toma de muestras para tener una mejor idea de los valores que corresponden realmente a los módulos que tienen nuestras carreteras con el fin de ajustar y mejorar los diseños.
- Los resultados obtenidos en este estudio tan solo son el inicio de este tipo de investigaciones, por lo tanto se recomienda realizar más ensayos para tener más precisión, es importante resaltar que debido a las características de los resultados obtenidos, no pueden ser utilizados para realizar cálculos de estructuras de pavimentos.

BIBLIOGRAFÍA

SOLMINIHAC T., Hernán, Gestión de Infraestructura Vial. Segunda edición. Editorial Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001

AASHTO, "AASHTO Guide for design of pavement structures" American Association of state Highways and Transportation Officials, Washington DC, 1993.

DOVAL MONTOYA, M.; GARCÍA ROMERO, E.; LUQUE DEL VILLAR, J.; MARTIN-VIVALDI CABALLERO, J. L.; y RODAS GONZALEZ, M. Arcillas Industriales: Yacimientos y Aplicaciones. En: Yacimientos Minerales. Editores: R. Lunar y R. Oyarzun. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S. A. Madrid. 1991.

JIMENEZ SALAS, Juanito, DE JUSTO ALPAÑES, J. L. Geotécnica y Cimientos. Vol. I. Propiedades de los Suelos y de las Rocas. Segunda Edición. Editorial Rueda, 1975.

SOLMINIHAC T.,Hernán. "El Deflectómetro de Impactos en la Evaluación estructural de Pavimentos", Boletín de Información Tecnológica – IT), Noviembre, 1994.

Grupo CECATA, Universidad Javeriana Fredy Reyes Profesor Asociado e investigador de pavimentos, Director de la Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos de la Universidad Javeriana.

ANEXO No. 1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO No. 2 RESULTADOS DE LAS DEFLEXIONES FWD

ANEXO No. 3 RESULTADOS DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES

ANEXO No. 4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION FWD

ANEXO No. 5 MEMORIAS DE CÁLCULO VERIFICACIÓN MÉTODO RACIONAL

**ANEXO No. 6 RESULTADOS DEL MODULO RESILIENTE OBTENIDO EN EL
LABORATORIO**